УДК 614.841.332

А. С. Дмитриченко¹, С. В. Здитовецкая¹, С. Ю. Яновский¹, К. Д. Керимов² ¹Белорусский государственный технологический университет ²Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям

Республики Беларусь

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ СВЕТОПРОЗРАЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПО КРИТЕРИЯМ ЦЕЛОСТНОСТИ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Выполнены расчеты распределения температуры и напряжений в ограниченной стеклянной панели с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивных особенностей светопрозрачной конструкции и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды в процессе пожара. Разработан программный код для расчета распределения температуры и напряжения в ограниченной стеклянной панели, позволяющий рассчитывать предельное время огнестойкости светопрозрачной конструкции. Определено предельное время огнестойкости конструкции по критериям целостности и теплоизоляции.

Ключевые слова: светопрозрачная конструкция, тепловое воздействие, термическое напряжение.

A. S. Dmitrichenko¹, S. V. Zditovetskaya¹, S. Yu. Yanovskiy¹, K. D. Kerimov² ¹Belarusian State Technological University

²University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus

CALCULATION OF THE LIMIT OF FIRE RESISTANCE OF THE TRANSLUCENT STRUCTURES BY CRITERIA OF INTEGRITY AND THERMAL INSULATION

Calculations of distribution of temperature and tension in the limited glass panel taking into account temperature dependence of thermophysical characteristics of glass, air and combustion gases, structure features of construction and the nonlinear nature of change of ambient temperature in the course of the fire are executed. The program code for calculation of distribution of temperature and tension in the limited glass panel allowing to count limit time of fire resistance of a translucent structure is developed. Limit time of fire resistance of a translucent structure is determined by criteria of integrity and thermal insulation.

Key words: translucent structure, thermal influence, thermal tension.

Введение. Важным фактором, определяющим возможность использования светопрозрачных конструкций (СПК) в строительстве, является их способность противостоять разрушению при огневом воздействии, что влияет на интенсивность развития пожара и его ликвидацию. Обусловлено это тем, что при разрушении СПК в зоне горения отмечается резкое увеличение притока воздуха, при котором происходит быстрое выгорание всего помещения. Значительно замедлить интенсивность пожара и повысить безопасность людей в зданиях позволит повышение пожароустойчивости СПК.

Для достижения указанной цели требуется изучение поведения СПК в условиях пожара и разработка методики оценки ее огнестойкости. Актуальными являются исследования, направленные на развитие теоретических основ и получение новых экспериментальных данных по поведению светопрозрачных строительных конструкций при пожаре. В Еврокодах [1–7] приводятся расчетные методы для оценки огнестойкости строительных конструкций из железобетона [2], стали [3], сталежелезобетона [4], дерева [5], камня [6], алюминия [7]. В то же время Еврокод для оценки огнестойкости СПК до настоящего времени не разработан. В существующих нормативных документах по способам определения огнестойкости и пожарной опасности СПК [8, 9] приводятся экспериментальные методы огневых испытаний. Расчетные методики разработаны недостаточно и требуют теоретического обоснования.

Методика, приведенная в [9], позволяет определять огнестойкость образцов стекла размером не менее 1200×1000 мм, не входящего в состав строительной конструкции. При этом, согласно [9], устанавливается предел огнестойкости по всем предельным состояниям, необходимым для данного вида СПК, по критериям несущей способности, целостности, изоляции.

Огнестойкость СПК заключается в ее способности сохранять несущие и ограждающие функции в условиях пожара. В общем случае эта оценка состоит в определении промежутка времени от начала огневого воздействия по стандартному температурному режиму до наступления одного из нормируемых для рассматриваемой конструкции предельных состояний по огнестойкости, перечисленных выше.

Основная часть. Рассмотрим задачу о распределении температуры в стеклянной панели, заключенной в раму шириной d. Начало координат разместим в центре панели на краю рамы и направим ось z вдоль кромки рамы, ось y перпендикулярно кромке рамы по направлению к центру панели (высота панели равна 2H), ось xперпендикулярно поверхности стеклянной панели толщиной L (рис. 1).



Рис. 1. Стеклянная панель, заключенная в раму

Для определения поля температуры в стеклянной пластине необходимо решить дифференциальное уравнение теплопроводности [10]:

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + I(t) k e^{-kx} \eta(y); \ 0 < x < L; \ -d < y < H,$$
(1)

где ρ – плотность, кг/м³; *с* – теплоемкость, Дж/(кг · К); *T*(*x*, *y*, *t*) – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); *x*, *y* – пространственные координаты, м; *t* – время, с; *I*(*t*) – плотность лучистого потока, поступающего на поверхность пластины, Вт/м²; *k* – коэффициент поглощения, м⁻¹; $\eta(y)$ – единичная функция Хевисайда ($\eta(y) = 0$ при *y* < 0; $\eta(y) = 1$ при *y* > 0).

Начальное условие имеет вид

$$T(x, y, 0) = T_i$$
 при $t = 0,$ (2)

где *T_i* – начальная температура пластины, К.

Краевые условия записаны в виде

$$-\lambda \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = [h_1(T_{c1}(t) - T(0, y, t)) + \epsilon_{np} \sigma (T_{c1}^4(t) - T^4(0, y, t))] \eta(y)$$
при $x = 0;$ (3)

$$-\lambda \frac{\partial T(L, y, t)}{\partial x} = [h_2(T(L, y, t) - T_{c2}(t)) + \epsilon_{np}\sigma(T^4(L, y, t) - T_{c2}^4(t))]\eta(y) \text{ при } x = L; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(x, -d, t)}{\partial y} = \frac{\partial T(x, H, t)}{\partial y} = 0,$$
(5)

Труды БГТУ Серия 2 № 1 2019

где h_1 , h_2 – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхностей, Вт/(м² · K); $T_{c1}(t)$, $T_{c2}(t)$ – температура окружающей среды, K; ε_{np} – приведенная степень черноты; σ – постоянная Стефана – Больцмана (σ = 5,67 · 10⁻⁸ Вт/(м² · K⁴)); L – толщина пластины, м.

Приведенная степень черноты находится из соотношения

$$\varepsilon_{\rm np} = \frac{1}{(1/\varepsilon_{\rm cp} + 1/\varepsilon_{\rm n} - 1)},\tag{6}$$

где ϵ_{cp} , ϵ_n – степень черноты среды и поверхности стекла соответственно.

Коэффициент конвективного теплообмена от среды, нагреваемой пожаром $h_2(T(L, t), T_{c2}(t))$, меняется с изменением температуры дымовых газов и температуры обогреваемой поверхности пластины. Коэффициент конвективного теплообмена от необогреваемой поверхности пластины и окружающим воздухом $h_1(T(0, t), T_{c1})$ меняется с ростом температуры необогреваемой поверхности.

Средний коэффициент теплоотдачи для вертикальной поверхности высотой H с учетом ламинарного и турбулентного режимов в широком диапазоне изменения параметров (критерий Прандтля Pr = 0,022-7640, критерий Релея $Ra_{H} = 10^{-4}-10^{15}$) можно определить из выражений [11]:

$$h_{1} = \frac{\operatorname{Nu}_{cp,B}\lambda_{B}}{H}; \qquad (7)$$
$$h_{2} = \frac{\operatorname{Nu}_{cp,r}\lambda_{r}}{H},$$

где Nu_{cp} – критерий Нуссельта; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); *H* – высота стеклянной панели, м. Индексы: в – воздух; г – дымовые газы.

Критерий Нуссельта для воздуха и дымовых газов рассчитывается по формулам

$$Nu_{cp,B}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 \text{Ra}_{H,B}^{1/6}}{\left[1 + (0,492/\text{Pr}_{B})^{9/16}\right]^{8/27}};$$

$$Nu_{cp,\Gamma}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 \text{Ra}_{H,\Gamma}^{1/6}}{\left[1 + (0,492/\text{Pr}_{\Gamma})^{9/16}\right]^{8/27}},$$
(8)

где Ra – критерий Релея; Pr – критерий Прандтля. При этом критерий Грасгофа для воздуха и

дымовых газов вычисляется по формулам

$$Gr_{H,B} = \frac{g\beta_t (T_{\infty} - T_{\Pi})H^3}{\nu_B^2};$$

$$Gr_{H,\Gamma} = \frac{g\beta_t (T_{\infty} - T_{\Pi})H^3}{\nu_{\Gamma}^2},$$
(9)

где Gr – критерий Грасгофа; g – ускорение силы тяжести, м/с²; $\beta_t = 1 / T$ – термический коэффициент объемного расширения, K⁻¹; T_{∞} – температура окружающей среды, °C; T_{π} – температура поверхности стеклянной панели, °C; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Критерий Прандтля для воздуха и дымовых газов находится из следующих соотношений:

$$Pr_{_{B}} = \frac{v_{_{B}}}{a_{_{B}}};$$

$$Pr_{_{\Gamma}} = \frac{v_{_{\Gamma}}}{a_{_{\Gamma}}},$$
(10)

где a – коэффициент температуропроводности, m^2/c .

Критерий Релея для воздуха и дымовых газов рассчитывается по формулам

$$Ra_{H,B} = Gr_{H,B}Pr_{B};$$

$$Ra_{H,r} = Gr_{H,r}Pr_{r}.$$
(11)

Теплофизические и динамические параметры, входящие в формулы (4)–(10), берутся при температуре T_{co} :

$$T_{\rm cp} = \frac{T_{\infty} - T_{\rm n}}{2}.$$
 (12)

Свойства воздуха и дымовых газов при разных температурах, приведенные в [11], аппроксимированы полиномами второй степени:

$$\lambda_{\rm B}(T) = 0,02428 + 8,120878 \cdot 10^{-3} \cdot T - -2,971432 \cdot 10^{-8} \cdot T^2;$$
(13)

$$\nu_{\rm B}(T) = 1,319498 \cdot 10^{-5} + 9,118545 \cdot 10^{-8} \cdot T + + 8,279991 \cdot 10^{-11} \cdot T^2;$$
(14)

$$Pr_{_{B}}(T) = 0,707193 - 2,040537 \cdot 10^{-4} \cdot T + + 3,26627 \cdot 10^{-7} \cdot T^{2};$$
(15)

$$\lambda_{\rm r}(T) = 0,022854 + 8,499151 \cdot 10^{-5} \cdot T - -9,64936 \cdot 10^{-10} \cdot T^2;$$
(16)

$$\nu_{r}(T) = 1,10659 \cdot 10^{-5} + 9,905 \cdot 10^{-8} \cdot T + 6,376374 \cdot 10^{-11} \cdot T^{2};$$
(17)

$$Pr_{r}(T) = 0,71022 - 1,88012 \cdot 10^{-4} \cdot T + 5,594406 \cdot 10^{-8} \cdot T^{2}.$$
 (18)

Теплофизические свойства образцов оконного стекла исследовались в интервале температур 25–500°С на приборе LFA 457 MicroFlash фирмы NETZSCH [12] методом лазерной вспышки [13]. Зависимость коэффициента теплопроводности и коэффициента температуропроводности оконного стекла от температуры может быть аппроксимирована полиномами второй степени:

$$\lambda = 0.718899 + 1.541745 \cdot 10^{-3} \cdot T - -1.39502 \cdot 10^{-6} \cdot T^{2};$$
(19)

$$a = 4,378452 \cdot 10^{-7} + 4,179546 \cdot 10^{-10} \cdot T + 5,629294 \cdot 10^{-10} \cdot T^{2}.$$
 (20)

Среднеобъемную температуру помещения при огневом воздействии $T_{c2}(t)$ зададим при помощи стандартной кривой пожара [9]:

$$T_{\rm II}(t) = 345 \lg(0, 1383 t + 1) + T_0, \qquad (21)$$

где $T_n(t)$ – температура огневого воздействия, °C; t – время воздействия, c; T_0 – начальная температура огневого воздействия, °C.

Распределение напряжений σ_{zz} , H/m^2 , в стекле в области -d < y < H можно определить из выражения

$$\sigma_{zz}(y,t) = \frac{E\beta}{L(H+d)} \int_{-d0}^{HL} T(x, y, t) dx dy - \frac{E\beta}{L} \int_{0}^{L} T(x, y, t) dx, \qquad (22)$$

где E – модуль Юнга, H/M^2 ; β – коэффициент линейного теплового расширения стекла, K^{-1} .

Для расчета распределения температуры в стеклянной панели с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик стекла, воздуха, дымовых газов и нелинейного характера изменения температуры окружающей среды в процессе пожара была решена задача (4)–(21) методом конечных элементов с использованием пакета FlexPDE [14, 15].

Полученная зависимость поля напряжений от пространственных координат и времени была использована для расчета предела огнестойкости СПК по критерию потери целостности.

Время достижения критических напряжений τ_b в панели, приводящих к ее разрушению, определится из формулы (22)

$$\sigma_{zz}(-d,\tau_b) = \sigma_b, \qquad (23)$$

где σ_b – критические напряжения, приводящие к разрушению стекла.

Выражение (23) можно переписать в виде

$$\Delta T(-d, \tau_b) = \frac{\sigma_{zz}(-d, \tau_b)}{E\beta} = \frac{\sigma_b}{E\beta} = T_k, \quad (24)$$

где T_k – критическая температура перегрева центральной части панели относительно ее

края, приводящая к возникновению критических напряжений.

По формулам (22) и (24) были выполнены расчеты времени достижения критических напряжений τ_b в панели, приводящих к ее разрушению, при вариации параметров модели.

На рис. 2 представлена зависимость времени достижения критических напряжений τ_b в панели от ее толщины при разной ширине затенения панели рамой. При этом критическая температура составляет 110°С, длина поглощения – 2 мм, интенсивность падающего излучения – 10 кВт/м².



Рис. 2. Зависимость времени достижения критических напряжений в панели от ее толщины при разной ширине затенения панели: l - d = 10 мм; 2 - d = 18 мм

Увеличение времени достижения критических напряжений в панели с уменьшением ширины затенения можно объяснить следующим образом. Растягивающие напряжения, возникающие в затененной области панели, пропорциональны разности температур центральной зоны панели, подверженной излучению, и ее затененной части. Если ширину затененной части панели уменьшить, то за счет теплопроводности температура этой зоны повысится и уменьшится разность температур с центральной зоной, а значит, уменьшатся и напряжения. Поэтому центральная зона панели должна нагреться до больших значений, чтобы возникли критические напряжения, т. е. время разрушения панели увеличивается.

Рассмотрим предельное состояние стеклянной панели по критерию I_2 (изоляция). Образец стекла достиг предельного состояния по критерию I_2 , если повышение температуры в любой точке не подвергаемой огневому воздействию поверхности стекла более чем на 180°С по сравнению с ее начальной средней температурой. Определить время τ_{mt} повышения температуры в любой точке не подвергаемой огневому воздействию поверхности стекла более чем на 180°С по сравнению с ее начальной средней температурой можно из соотношения

$$\max(T(0, y, \tau_{mt})) - T_0 > 180^{\circ}\text{C}.$$
 (25)

На рис. 3 приведена зависимость предела огнестойкости τ_{mt} по критерию достижения максимального перегрева необогреваемой поверхности панели от толщины панели при разных длинах поглощения излучения и разных интенсивностях падающего излучения. При этом принимались половина ширины панели 0,9 м, ширина затенения, равная 18 мм.



Рис. 3. Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения максимального перегрева необогреваемой поверхности от ее толщины при разных интенсивностях падающего излучения и длинах поглощения излучения: $I - I = 5 \text{ кBt/m}^2$; $2 - I = 10 \text{ kBt/m}^2$; $3 - I = 15 \text{ kBt/m}^2$

Как видно из приведенных зависимостей, время достижения перегрева необогреваемой поверхности панели увеличивается с увеличением толщины панели: тем больше, чем больше длина поглощения излучения в стекле и тем меньше, чем больше интенсивность падающего излучения.

Рассмотрим предельное состояние стеклянной панели по критерию I_1 (изоляция). Образец стекла достиг предельного состояния по критерию I_1 , если повышение средней температуры не подвергаемой огневому воздействию поверхности стекла более чем на 140°С по сравнению с ее начальной средней температурой.

В этом случае определить время т_s повышения средней температуры не подвергаемой огневому воздействию поверхности стекла более чем на 140°С по сравнению с ее начальной средней температурой можно из соотношения

$$\frac{1}{L(H+d)} \int_{-d}^{H} \int_{0}^{L} T(x, y, \tau_s) dx dy - T_0 > 140^{\circ} \text{C}.$$
(26)

На рис. 4 приведена зависимость предела огнестойкости τ_s по критерию достижения среднего перегрева необогреваемой поверхности панели от толщины панели при разных длинах поглощения излучения и разных интенсивностях падающего излучения. При этом принимались половина ширины панели 0,9 м, ширина затенения, равная 18 мм.



Рис. 4. Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения перегрева необогреваемой поверхности от ее толщины при разных интенсивностях падающего излучения и длинах поглощения излучения: $I - I = 5 \text{ кBT/m}^2$; $2 - I = 10 \text{ кBT/m}^2$; $3 - I = 15 \text{ кBT/m}^2$

Как видно из приведенных зависимостей, время достижения перегрева необогреваемой поверхности панели увеличивается с увеличением толщины панели: тем больше, чем больше длина поглощения излучения в стекле и тем меньше, чем больше интенсивность падающего излучения.

На рис. 5 приведена зависимость пределов огнестойкости т от толщины панели, рассчитанных по критерию достижения среднего перегрева необогреваемой поверхности панели, по критерию достижения максимального перегрева необогреваемой поверхности панели и по критерию достижения критических напряжений в панели, приводящих к ее разрушению. Принимались половина ширины панели 0,9 м, ширина затенения 18 мм, длина поглощения 2 мм, интенсивность падающего излучения 10 кВт/м².

Как видно из приведенных зависимостей, критерий достижения среднего перегрева не-

обогреваемой поверхности панели более жесткий по сравнению с критерием достижения максимального перегрева необогреваемой поверхности панели. Предел огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в панели, приводящих к ее разрушению, зависит от прочности стекла и может быть как больше, так и меньше пределов огнестойкости по критерию теплоизоляции.



 критериев огнестойкости:
 1 – по критерию достижения критических напряжений (138 МПа) в панели, приводящих к ее разрушению;

 2 – по критерию достижения максимального перегрева необогреваемой поверхности панели;
 3 – по критерию достижения перегрева средней температуры необогреваемой поверхности панели;

4 – по критерию достижения критических напряжений (47 МПа) в панели, приводящих к ее разрушению

Заключение. На основе разработанного программного кода с использованием пакета FlexPDE для расчета распределения температуры и напряжений в ограниченной стеклянной панели возможно определять предельное время огнестойкости СПК по критериям целостности и теплоизоляции. При этом учитываются температурная зависимость теплофизических характеристик стекла, воздуха и дымовых газов, конструктивные особенности СПК и нелинейный характер изменения температуры окружающей среды при огневом воздействии.

Литература

1. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire: EN 1991-1-2:2002. Brussels: European committee for standardization, 2002. 61 p.

2. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1992-1-2:2004. Brussels: European committee for standardization, 2004. 99 p.

3. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1993-1-2:2005. Brussels: European committee for standardization, 2005. 78 p.

4. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1994-1-2:2005. Brussels: European committee for standardization, 2005. 109 p.

5. Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1995-1-2:2004. Brussels: European committee for standardization, 2004. 69 p.

6. Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1996-1-2:2005. Brussels: European committee for standardization, 2005. 83 p.

7. Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1999-1-2:2007. Brussels: European committee for standardization, 2007. 61 p.

8. Fire resistance tests. Part 1: General requirements: EN 1363-1:1999. Moscow: BSI, 1999. 52 p.

9. Стекло и изделия из него. Метод испытания на огнестойкость: ГОСТ 33000-2014. Введ. 01.04.2016. М.: Стандартинформ, 2015. 13 с.

10. Расчет предела огнестойкости светопрозрачной конструкции по критерию потери теплоизолирующей способности / А. С. Дмитриченко [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2017. № 1 (41). С. 15–23.

11. Мартыненко О. Г., Соковишин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмен. Справочник. Минск: Наука и техника, 1982. 399 с.

12. Приборы термического анализа группы NETZSCH [Электронный pecypc]. URL: http:// www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions.html (дата обращения: 20.06.2018).

13. Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // Journal of Appl. Physics. 1961. Vol. 32, no. 9. P. 1675–1684.

14. FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations [Электронный ресурс]. URL: http://www.pdesolutions.com (дата обращения: 15.01.2018).

15. Расчет предела огнестойкости светопрозрачной конструкции по критерию потери целостности / А. С. Дмитриченко [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2017. № 2 (42). С. 27–37.

References

1. EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels, European committee for standardization, 2002. 61 p.

2. EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. Brussels, European committee for standardization, 2004. 99 p.

3. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. Brussels, European committee for standardization, 2005. 78 p.

4. EN 1994-1-2:2005. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. Brussels, European committee for standardization, 2005. 109 p.

5. EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. Brussels, European committee for standardization, 2004. 69 p.

6. EN 1996-1-2:2005. Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. Brussels, European committee for standardization, 2005. 83 p.

7. EN 1999-1-2:2007. Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. Brussels, European committee for standardization, 2007. 61 p.

8. EN 1363-1:1999. Fire resistance tests. Part 1: General requirements. Moscow, BSI, 1999. 52 p.

9. GOST 33000–2014. Glass and products from it. A test method on fire resistance. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 13 p. (In Russian).

10. Dmitrichenko A. S., Yanovskiy S. Yu., Chernevich O. V., Kerimov K. D. Calculation of a limit of fire resistance of a translucent design for criterion of loss of the heat-insulating ability. *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya* [Emergency situations: prevention and elimination], 2017, no. 1 (41), pp. 15–23 (In Russian).

11. Martynenko O. G., Sokovishin Yu. A. *Svobodno-konvektivnyy teploobmen. Spravochnik* [Free and convective heat exchange. Reference book]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 399 p.

12. *Pribory termicheskogo analiza gruppy NETZSCH* [Devices of the thermal analysis of NETZSCH group]. Available at: http://www.netzsch-thermalanalysis.com/en/products-solutions.html (accessed 20.06.2018).

13. Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. *Journal of Appl. Physics*, 1961, vol. 32, no. 9, pp. 1675–1684.

14. FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations. Available at: http:// www.pdesolutions.com (accessed 15.06.2018).

15. Dmitrichenko A. S., Yanovskiy S. Yu., Chernevich O. V., Kerimov K. D. Calculation of a limit of fire resistance of a translucent design for criterion of loss of integrity. *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya* [Emergency situations: prevention and elimination], 2017, no. 2 (42), pp. 27–37 (In Russian).

Информация об авторах

Дмитриченко Александр Степанович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: egit@ belstu.by

Здитовецкая Светлана Валентиновна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: teka_11@ mail.ru

Яновский Сергей Юрьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: yanovskiy@mail.ru

Керимов Керим Джамалович – адъюнкт. Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25, Республика Беларусь). E-mail: kerimk@mail.ru

Information about the authors

Dmitrichenko Aleksandr Stepanovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Energy-Saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: egit@belstu.by

Zditovetskaya Svetlana Valentinovna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Energy-Saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: teka_11@mail.ru

Yanovskiy Sergey Yur'yevich – PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, the Department of Energy-Saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yanovskiy@mail.ru

Kerimov Kerim Dzhamalovich – adjunct. University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus (25, Mashinostroiteley str., 220118, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kerimk@mail.ru

Поступила 30.10.2018